Respuesta a la pregunta inicial del capítulo



Sí. Eso es lo que logra un refrigerador: hace que fluya calor del interior frío del refrigerador al exterior cálido. La segunda ley de la termodinámica dice que no puede haber un flujo *espontáneo* de calor de un cuerpo frío a uno caliente. El refrigerador cuenta con un motor que efectúa trabajo sobre el sistema para *forzar* al calor a que fluya en ese sentido.

Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

Sección 20.1 Este proceso es irreversible. Al igual que deslizar un libro por una mesa, frotarse las manos utiliza fricción para convertir energía mecánica en calor. En el proceso opuesto (que es imposible), las manos se enfriarían espontáneamente y la energía así liberada haría que las manos se movieran rítmicamente.

Sección 20.2 El motor de cada camión rechaza 8000 J de calor por ciclo y efectúa 25 ciclos cada segundo. El calor total desprendido en 24 horas es entonces

$$|Q_{C-\text{total}}| = (1000 \text{ camiones})\left(\frac{8000 \text{ J}}{\text{camión}\cdot\text{ciclo}}\right)\left(\frac{25 \text{ ciclos}}{\text{s}}\right) \times \left(\frac{60 \text{ s}}{\text{min}}\right)\left(\frac{60 \text{ min}}{\text{h}}\right)(24 \text{ h}) = 1.7 \times 10^{13} \text{ J}$$

Esto equivale a 4.8×10^6 kilowatts-hora (un kilowatt-hora es una unidad de energía empleada en los sistemas de energía eléctrica, equivalente a 10^3 watts de potencia suministrados durante una hora). Un kilowatt-hora de energía eléctrica cuesta unos cuantos centavos de dólar, así que este calor desechado equivale a aproximadamente $100,000 dólares de energía perdida.

Sección 20.3 Sea Q_C, el aporte de calor con volumen V, constante. Entonces, una mayor razón de compresión r implica un mayor volumen máximo rV, así que los puntos d y a están más a la derecha en el diagrama pV de la figura 20.5 y el área encerrada por el lazo $abcd$ es mayor. El área dentro de dicho lazo es W, el trabajo efectuado por la máquina, así que una mayor razón de compresión implica más trabajo con el mismo aporte de calor y, por tanto, mayor eficiencia $e = W/Q_C$.

Sección 20.4 Un refrigerador utiliza un suministro de trabajo para transferir calor de un sistema (el interior del refrigerador) a otro (su exterior, que incluye la casa donde el refrigerador está instalado). Si la puerta está abierta, estos dos sistemas son en realidad *el mismo* sistema, y tarde o temprano estarán a la misma temperatura. Por la primera ley de la termodinámica, todo el suministro de trabajo al motor del refrigerador se convertirá en calor y la temperatura de la casa *aumentará*. Para enfriar la casa se requiere un sistema que transfiera calor de ella al mundo exterior, como un acondicionador de aire o una bomba de calor.

Sección 20.5 El vapor de agua en expansión efectúa trabajo al empujar el corcho hacia arriba. Este proceso no es 100% eficiente porque sólo una parte del calor absorbido del quemador efectúa trabajo; el resto eleva la temperatura del agua y del tubo de ensayo.

Sección 20.6 La eficiencia no puede ser mayor que la de una máquina de Carnot que opera entre los mismos límites de temperatura, $e_{\text{Carnot}} = 1 - (T_F/T_C)$ [ecuación (20.14)]. La temperatura T_F del depósito frío de este motor enfriado por aire es cercana a 300 K (temperatura ambiente) y la temperatura T_C del depósito caliente no puede exceder el punto de fusión del cobre, 1356 K (véase la tabla 17.4). Por tanto, la máxima eficiencia de Carnot que puede lograrse es $e = 1 - (300 \text{ K})/(1356 \text{ K}) = 0.78$, o sea, 78%. La temperatura de cualquier motor real sería menor, así que el motor del inventor jamás podrá alcanzar una eficiencia de 85%. Invierta su dinero en otra cosa.

Sección 20.7 El proceso descrito es exactamente opuesto al empleado en el ejemplo 20.10, así que el cambio neto de entropía sería -102 J/K. Este resultado viola la segunda ley de la termodinámica, que dice que la entropía de un sistema aislado no puede disminuir. Este notable proceso es imposible.

Sección 20.8 (a) En el ejemplo 20.8 (sección 20.7) vimos que, para el gas ideal, el cambio de entropía durante una expansión libre es igual al de una expansión isotérmica. Por la ecuación (20.23), esto implica que la razón del número de estados microscópicos después y antes de la expansión, w_2/w_1, también es la misma en los dos casos. Por el ejemplo 20.11, $w_2/w_1 = 2^N$, así que el número de estados microscópicos aumenta en un factor de 2^N. (b) En una expansión reversible, el cambio de entropía es $\Delta S = \int dQ/T = 0$. Si la expansión es adiabática, no hay flujo de calor, así que $\Delta S = 0$. Por la ecuación (20.23), $w_2/w_1 = 1$ y el número de estados microscópicos *no* cambia. La diferencia es que, durante una expansión adiabática, la temperatura baja y las moléculas se mueven más lentamente, de modo que pueden estar en menos estados microscópicos que durante una expansión isotérmica.

Preguntas para análisis

P20.1 Una olla está llena a la mitad con agua y se tapa formando un sello hermético que no permite el escape de vapor. La olla se calienta en una estufa, formándose vapor de agua dentro de ella. La estufa se apaga y el vapor se condensa. ¿Este ciclo es reversible o irreversible? ¿Por qué?

P20.2 Cite dos ejemplos de procesos reversibles y dos de procesos irreversibles en sistemas puramente mecánicos, como bloques que se deslizan por planos, resortes, poleas y cuerdas. Explique qué hace a cada proceso reversible o irreversible.

P20.3 ¿Qué procesos irreversibles se efectúan en un motor a gasolina? ¿Por qué son irreversibles?

P20.4 Suponga que trata de enfriar su cocina dejando abierta la puerta del refrigerador. ¿Qué sucede? ¿Por qué? ¿Sería el resultado el mismo si se dejara abierta una hielera llena de hielo? Explique las diferencias, si las hay.

P20.5 Un congresista de EE.UU. propuso un plan para producir energía. Se rompen moléculas de agua (H_2O) para producir hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno se quema (se combina con oxígeno) para liberar energía. El único producto de esta combustión es agua, así que no hay contaminación. A la luz de la segunda ley de la termodinámica, ¿qué piensa usted de este plan?

P20.6 Algunos críticos de la evolución biológica aseguran que viola la segunda ley de la termodinámica, pues implica organismos simples que dan origen a otros más ordenados. Explique por qué éste no es un argumento válido contra la evolución.

P20.7 Convertir energía mecánica totalmente en calor, ¿viola la segunda ley de la termodinámica? ¿Y convertir calor totalmente en trabajo? Explique.

P20.8 Al crecer, una planta crea una estructura muy compleja y organizada a partir de materiales simples, como: aire, agua y minerales. ¿Viola esto la segunda ley de la termodinámica? Explique. ¿Cuál es la fuente de energía final de la planta? Explique su razonamiento.

P20.9 Imagine un filtro de aire especial colocado en la ventana de una casa. El filtro sólo permite la salida de moléculas cuya rapidez sea mayor que cierto valor, y sólo permite la entrada de moléculas cuya rapidez sea menor que ese valor. Explique por qué tal filtro enfriaría la casa y por qué la segunda ley de la termodinámica imposibilita la construcción de semejante filtro.

P20.10 El eje de un motor eléctrico está acoplado al de un generador eléctrico. El motor impulsa al generador, y una parte de la corriente de éste opera el motor. El resto de la corriente se usa para iluminar una casa. ¿Qué defecto tiene este esquema?

P20.11 Si un trapo mojado se cuelga en un viento caliente en el desierto, se enfría por evaporación a una temperatura hasta 20 C° menor que la del aire. Analice esto de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica.

P20.12 Si ninguna máquina real puede ser tan eficiente como una máquina de Carnot que opera entre las mismas temperaturas, ¿qué caso tiene deducir y usar la ecuación (20.14)?

P20.13 Suponga que quiere aumentar la eficiencia de una máquina de calor. ¿Sería mejor aumentar T_C o reducir T_F la misma cantidad? ¿Por qué?

P20.14 ¿Qué eficiencia tendría una máquina de Carnot que opera con $T_C = T_F$? ¿Y si $T_F = 0$ K y T_C fuera cualquier temperatura mayor que 0 K? Interprete sus respuestas.

P20.15 Las máquinas de calor reales, como el motor a gasolina de un auto, siempre tienen fricción entre sus piezas móviles, aunque los lubricantes la reducen al mínimo. ¿Una máquina de calor con piezas totalmente sin fricción sería 100% eficiente? ¿Por qué sí o por qué no? ¿Depende la respuesta de si la máquina ejecuta un ciclo de Carnot o no? ¿Por qué sí o por qué no?

P20.16 ¿Un refrigerador lleno de alimentos consume más potencia si la temperatura ambiente es 20°C que si es 15°C? ¿O el consumo es el mismo? Explique su razonamiento.

P20.17 Explique por qué cada uno de los procesos siguientes es un ejemplo de desorden o aleatoriedad creciente: mezclado de agua caliente y fría; expansión libre de un gas; flujo irreversible de calor; producción de calor por fricción mecánica. ¿Hay aumentos de entropía en todos? ¿Por qué sí o por qué no?

P20.18 ¿La Tierra y el Sol están en equilibrio térmico? Hay cambios de entropía asociados a la transmisión de energía del Sol a la Tierra? ¿La radiación es diferente de otros modos de transferencia de calor respecto a los cambios de entropía? Explique su razonamiento.

P20.19 Analice los cambios de entropía implicados en la preparación y consumo de un *hot fudge sundae* (helado bañado con jarabe de chocolate caliente).

P20.20 Si proyectamos una película en reversa, es como si se invirtiera la dirección del tiempo. En tal proyección, ¿veríamos procesos que violan la conservación de la energía? ¿La conservación de la cantidad de movimiento lineal? ¿La segunda ley de la termodinámica? En cada caso en que puedan verse procesos que violan una ley, dé ejemplos.

Ejercicios

Sección 20.2 Máquinas de calor

20.1 Un motor a diesel efectúa 2200 J de trabajo mecánico y desecha (expulsa) 4300 J de calor cada ciclo. a) ¿Cuánto calor debe aportarse al motor en cada ciclo? b) Calcule la eficiencia térmica del motor.

20.2 Un motor de avión recibe 9000 J de calor y desecha 6400 J cada ciclo. a) Calcule el trabajo mecánico efectuado por el motor en un ciclo. b) Calcule la eficiencia térmica del motor.

20.3 **Motor a gasolina**. Un motor a gasolina recibe 1.61×10^4 J de calor y produce 3700 J de trabajo por ciclo. El calor proviene de quemar gasolina que tiene un calor de combustión de 4.60×10^4 J/g. a) Calcule la eficiencia térmica. b) ¿Cuánto calor se desecha en cada ciclo? c) ¿Qué masa de gasolina se quema en cada ciclo? d) Si el motor opera a 60.0 ciclos/s, determine su salida de potencia en kilowatts y en hp.

20.4 Un motor a gasolina desarrolla una potencia de 180 kW (aproximadamente 241 hp). Su eficiencia térmica es de 28.0%. a) ¿Cuánto calor debe aportarse al motor por segundo? b) ¿Cuánto calor desecha el motor cada segundo?

20.5 Cierta planta nuclear produce una potencia mecánica (que impulsa un generador eléctrico) de 330 MW. Su tasa de aporte de calor proveniente del reactor nuclear es de 1300 MW. a) Calcule la eficiencia térmica del sistema. b) ¿Con qué rapidez desecha calor el sistema?

Sección 20.3 Motores de combustión interna

20.6 Para un gas con $\gamma = 1.40$, ¿qué razón de compresión r debe tener un ciclo Otto para lograr una eficiencia ideal de 65.0%?

20.7 Para un ciclo Otto con $\gamma = 1.40$ y $r = 9.50$, la temperatura de la mezcla gasolina-aire al entrar en el cilindro es de 22.0°C (punto a en la Fig. 20.5). a) Determine la temperatura al final de la carrera de compresión (punto b). b) La presión inicial de la mezcla (punto a) es de 8.50×10^4 Pa, un poco menor que la atmosférica. Calcule la presión al final de la carrera de compresión.

20.8 El motor de ciclo Otto de un Mercedes-Benz SLK230 tiene una razón de compresión de 8.8. a) Calcule la eficiencia ideal del motor. Use $\gamma = 1.40$. b) El motor de un Dodge Viper GT2 tiene una razón de compresión un poco mayor, de 9.6. ¿Cuánto aumenta la eficiencia con este aumento en la razón de compresión?

Sección 20.4 Refrigeradores

20.9 Un refrigerador tiene un coeficiente de rendimiento de 2.10. Durante cada ciclo, absorbe 3.40×10^4 J del depósito frío. a) ¿Cuánta energía mecánica se requiere en cada ciclo para operar el refrigerador? b) Durante cada ciclo, ¿cuánto calor se desecha al depósito caliente?

20.10 Refrigerante líquido a una presión de 1.34×10^5 Pa y –23.0°C sale de la válvula de expansión de un refrigerador y fluye por las espiras de evaporación a la misma presión y a –20.5°C, la temperatura del interior del refrigerador. El punto de ebullición del refrigerante a esta presión es –23.0°C, su calor de vaporización es 1.60×10^5 J/kg y la capacidad calorífica específica a presión constante del vapor es de 485 J/kg · K. El coeficiente de rendimiento del refrigerador es $K = 2.8$. Si 8.00 kg de refrigerante fluye por el refrigerador cada hora, calcule la potencia eléctrica que debe suministrarse al refrigerador.

20.11 En un minuto, un acondicionador de aire de ventana absorbe 9.80×10^4 J de calor de la habitación enfriada y deposita 1.44×10^5 J de calor a el aire exterior. a) Calcule el consumo de potencia de la unidad en watts. b) Calcule la calificación de eficiencia de energía de la unidad.

20.12 Un congelador tiene un coeficiente de rendimiento de 2.40, y debe convertir 1.80 kg de agua a 25.0°C en 1.80 kg de hielo a –5.0°C en una hora. a) ¿Cuánto calor es necesario extraer de esa agua? b) ¿Cuánta energía eléctrica consume el congelador en esa hora? c) ¿Cuánto calor de desecho (expulsado) fluye al cuarto donde está el congelador?

Sección 20.6 El ciclo de Carnot

20.13 Un máquina de Carnot cuyo depósito de alta temperatura está a 620 K recibe 550 J de calor a esta temperatura en cada ciclo y cede 335 J al depósito de baja temperatura. a) ¿Cuánto trabajo mecánico realiza la máquina en cada ciclo? b) ¿A qué temperatura está el depósito frío? c) Calcule la eficiencia térmica del ciclo.

20.14 Una máquina de Carnot opera entre dos depósitos de calor a 520 K y 300 K. a) Si el motor recibe 6.45 kJ de calor del depósito a 520 K en cada ciclo, ¿cuántos joules por ciclo cede al depósito a 300 K? b) ¿Cuánto trabajo mecánico realiza la máquina en cada ciclo? c) Determine la eficiencia térmica de la máquina.

20.15 Una máquina para hacer hielo opera en un ciclo de Carnot; toma calor de agua a 0.0°C y desecha calor a un cuarto a 24.0°C. Suponga que 85.0 kg de agua a 0.0°C se convierten en hielo a 0.0°C. a) ¿Cuánto calor se desecha al cuarto? b) ¿Cuánta energía (trabajo) debe aportarse al aparato?

20.16 Un refrigerador de Carnot opera entre dos depósitos de calor a temperaturas de 320 K y 270 K. a) Si en cada ciclo el refrigerador recibe 415 J de calor del depósito a 270 K, ¿cuántos joules de calor cede al depósito a 320 K? b) Si el refrigerador realiza 165 ciclos/min, ¿qué aporte de potencia se requiere para operarlo? c) Calcule el coeficiente de rendimiento del refrigerador.

20.17 Un dispositivo de Carnot extrae 5.00 kJ de calor de un cuerpo a –10.0°C. ¿Cuánto trabajo se efectúa si el dispositivo desecha calor al entorno: a) a 25.0°C? b) a ¿0.0°C? c) a ¿–25.0°C? En cada caso, ¿el dispositivo actúa como máquina o como refrigerador?

20.18 Imagine que la compañía Refrigerápido, S.A., le ha pedido diseñar un congelador de alimentos que mantenga el compartimento de congelación a –5.0°C y opere en un recinto a 20.0°C. El congelador deberá producir 5.00 kg de hielo a 0.0°C, partiendo de agua a 20.0°C. Calcule la cantidad mínima de energía eléctrica con que podría hacerse ese hielo y la cantidad mínima de calor que podría desecharse al recinto.

20.19 Una máquina de Carnot ideal opera entre 500°C y 100°C con un suministro de calor de 250 J por ciclo. ¿Qué número mínimo de ciclos se requieren para que la máquina levante una piedra de 500 kg a una altura de 100 m?

20.20 Una máquina de Carnot tiene una eficiencia térmica de 0.600 y la temperatura de su depósito caliente es de 800 K. Si expulsa 3000 J de calor al depósito frío en un ciclo, ¿cuánto trabajo efectuará en ese tiempo?

20.21 Una máquina de calor de Carnot utiliza un depósito caliente que consiste en una gran cantidad de agua en ebullición y un depósito frío que consiste en una tina grande llena de hielo y agua. En cinco minutos de operación, el calor expulsado por la máquina derrite 0.0400 kg de hielo. En ese tiempo, ¿cuánto trabajo W efectúa la máquina?

20.22 Un inventor dice haber creado una máquina que en cada ciclo recibe 2.60×10^8 J de calor a una temperatura de 400 K, efectúa 42.0 kWh de trabajo mecánico y expulsa calor a una temperatura de 250 K. ¿Aconsejaría invertir dinero para poner esta máquina en el mercado? ¿Por qué sí o por qué no?

20.23 a) Demuestre que la eficiencia e de una máquina de Carnot y el coeficiente de rendimiento K de un refrigerador de Carnot tienen la relación $K = (1 - e)/e$. La máquina y el refrigerador operan entre los mismos depósitos caliente y frío. b) Calcule K para los valores límite $e \rightarrow 1$ y $e \rightarrow 0$. Explique.

Sección 20.7 Entropía

20.24 Un estudiante ocioso agrega calor a 0.350 kg de hielo a 0.0°C hasta derretirlo todo. a) Calcule el cambio de entropía del agua. b) La fuente de calor es un cuerpo muy masivo que está a 25.0°C. Calcule el cambio de entropía de ese cuerpo. c) Determine el cambio total de entropía del agua y la fuente de calor.

20.25 Imagine que vierte 100 g de agua a 80.0°C en el océano, que está a 20.0°C y espera unos 10 minutos. Trate al agua que virtió más el océano como sistema aislado. a) ¿El proceso es reversible o irreversible? Explique su razonamiento con argumentos físicos sencillos, sin recurrir a alguna ecuación. b) Calcule el cambio neto de entropía del sistema durante este proceso. Explique si el resultado es congruente o no con su respuesta a la parte (a).

20.26 Un bloque de hielo de 15.0 kg a 0.0°C se derrite dentro de un recinto grande cuya temperatura es de 20.0°C. Trate al hielo más el recinto como sistema aislado y suponga que el recinto es lo bastante grande como para despreciar su cambio de temperatura. a) ¿El proceso es reversible o irreversible? Explique su razonamiento con argumentos físicos sencillos, sin recurrir a alguna ecuación. b) Calcule el cambio neto de entropía del sistema durante este proceso. Explique si el resultado es congruente o no con su respuesta a la parte (a).

20.27 Calcule el cambio de entropía que tiene lugar cuando 1.00 kg de agua a 20.0°C se mezcla con 2.00 kg de agua a 80.0°C.

20.28 Tres moles de gas ideal sufren una compresión isotérmica reversible a 20.0°C, durante la cual se efectúa 1850 J de trabajo sobre el gas. Calcule ΔS del gas.

20.29 Calcule el cambio de entropía de 0.130 kg de helio gaseoso en el punto de ebullición normal del helio cuando se condensa isotérmicamente a 1.00 L de helio líquido. (*Sugerencia:* Véase la tabla 17.4 de la sección 17.6.)

20.30 a) Calcule el cambio de entropía cuando 1.00 kg de agua a 100°C se vaporiza y convierte en vapor a 100°C. (Véase la tabla 17.4.) b) Compare su respuesta con el cambio de entropía cuando 1.00 kg de hielo se funde a 0°C, calculado en el ejemplo 20.5 (sección 20.7). ¿Es ΔS mayor para la fusión o para la vaporización? Interprete su respuesta con base en la idea de que la entropía es una medida de la aleatoriedad de un sistema.

20.31 a) Calcule el cambio de entropía cuando 1.00 mol de agua (masa molar de 18.0 g/mol) a 100°C se evapora para formar vapor de agua a 100°C. b) Repita el cálculo de la parte (a) para: 1.00 mol de nitrógeno líquido, 1.00 mol de plata y 1.00 mol de mercurio cuando cada uno se vaporiza a su punto de ebullición normal. (Tome los calores de vaporización de la tabla 17.4 y las masas molares del apéndice D. Recuerde que la molécula de nitrógeno es N_2.) c) Sus resultados de las partes (a) y (b) deberán ser muy similares. (Esto se conoce como *regla de Drepez y Trouton*.) Explique por qué es natural que así suceda, con base en la idea de que la entropía es una medida de la aleatoriedad de un sistema.

20.32 Un bloque de cobre de 3.50 kg, inicialmente a 100.0°C, se pone en 0.800 kg de agua que está inicialmente a 0.0°C. a) Calcule la temperatura final del sistema. b) Calcule el cambio total de entropía para el sistema.

20.33 Dos moles de gas ideal sufren una expansión isotérmica reversible de 0.0280 m^3 a 0.0420 m^3 a una temperatura de 25.0°C. Calcule el cambio de entropía del gas.

*Sección 20.8 Interpretación microscópica de la entropía

***20.34** Una caja se divide, mediante una membrana, en dos partes de igual volumen. El lado izquierdo contiene 500 moléculas de nitrógeno gaseoso; el derecho contiene 100 moléculas de oxígeno gaseoso. Los dos gases están a la misma temperatura. La membrana se perfora y finalmente se logra el equilibrio. Suponga que el volumen de la caja es suficiente para que cada gas sufra una expansión libre y no cambie de temperatura. a) En promedio, ¿cuántas moléculas de cada tipo habrá en cada mitad de la caja? b) Calcule el cambio de entropía del sistema cuando se perfora la membrana. c) Calcule la probabilidad de que las moléculas se encuentren en la misma distribución que tenían antes de la perforación, esto es, 500 moléculas de N_2 en la mitad izquierda y 100 moléculas de O_2 en la derecha.

***20.35** Dos moles de gas ideal ocupan un volumen V. El gas se expande isotérmica y reversiblemente a un volumen $3V$. a) ¿Cambia la distribución de velocidades por esta expansión? Explique. b) Use la ecuación (20.23) para calcular el cambio de entropía del gas. c) Use la ecuación (20.18) para calcular el cambio de entropía del gas. Compare este resultado con el de la parte (b).

***20.36** Imagine que lanza cuatro monedas idénticas al piso. Hay la misma probabilidad de que cada moneda muestre cara o cruz. a) Calcule la probabilidad de que todas las monedas sean cara y de que todas sean cruz. b) Calcule la probabilidad de que tres monedas sean cara y una cruz, y de que tres sean cruz y una cara. c) Calcule la probabilidad de que dos monedas sean cara y dos cruz. d) Calcule y explique la suma de las cinco probabilidades calculadas en las partes (a) a (c).

Problemas

20.37 Se está diseñando una máquina de Carnot que usa dos moles de CO_2 como sustancia de trabajo; el gas puede tratarse como ideal. El CO_2 debe tener una temperatura máxima de 527°C y una presión máxima de 5.00 atm. Con un aporte de 400 J por ciclo, se desea obtener 300 J de trabajo útil. a) Calcule la temperatura del depósito frío. b) ¿Durante cuántos ciclos debe operar esta máquina para derretir totalmente un bloque de hielo con masa de 10.0 kg que inicialmente estaba a 0.0°C, empleando únicamente el calor expulsado por la máquina?

20.38 Una máquina de Carnot cuyo depósito de baja temperatura está a –90.0°C tiene una eficiencia de 40.0%. Se asigna a un ingeniero el problema de aumentar la eficiencia a 45.0%. a) ¿En cuántos grados Celsius debe aumentarse la temperatura del depósito caliente si la del frío permanece constante? b) ¿En cuántos grados Celsius debe reducirse la temperatura del depósito frío si la del caliente no cambia?

20.39 Una máquina de calor somete 0.350 mol de un gas diatómico con comportamiento ideal al ciclo que se muestra en el diagrama pV de la figura 20.20. El proceso 1 → 2 es a volumen constante, el 2 → 3 es adiabático y el 3 → 1 es a presión constante a 1.00 atm. Para este gas, $\gamma = 1.40$. a) Calcule la presión y el volumen en los puntos: 1, 2 y 3. b) Calcule Q, W y ΔU para cada uno de los tres procesos. c) Calcule el trabajo neto efectuado por el gas en el ciclo. d) Calcule el flujo neto de calor hacia la máquina en un ciclo. e) Determine la eficiencia térmica de la máquina y compárela con la de una máquina de Carnot que opera entre las mismas temperaturas mínima y máxima T_1 y T_2.

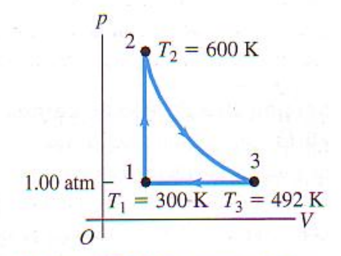


Figura 20.20 Problema 20.39.

20.40 Una máquina de calor opera con un ciclo *abcd*. La sustancia de trabajo es CO_2 gaseoso, que puede tratarse como gas ideal. La temperatura máxima del gas durante el ciclo es de 1000 K. La presión y el volumen del gas en cada estado son $p_a = p_d = 2.00 \times 10^5$ Pa; $p_b = p_c = 6.00 \times 10^5$ Pa; $V_a = V_b = 0.0100$ m^3; $V_c = V_d = 0.0300$ m^3. Calcule: a) el número de moles de CO_2; b) el suministro de calor en cada ciclo; c) el calor desechado por ciclo; d) el trabajo realizado por la máquina en cada ciclo; d) la eficiencia térmica de la máquina.

20.41 Bomba de calor. Una bomba de calor es una máquina de calor operada en reversa. En invierno, bombea calor del aire exterior frío al aire más cálido del interior del edificio, manteniéndolo a una temperatura agradable. En verano, bombea calor del aire más fresco dentro del edificio al aire más cálido del exterior, actuando como acondicionador de aire. a) Si la temperatura exterior en invierno es de –5.0°C y la temperatura interior es de 17.0°C, ¿cuántos joules de calor suministrará la bomba al interior por cada joule de energía eléctrica empleado para operar la unidad, suponiendo un ciclo ideal de Carnot? b) Suponga que tiene la opción de usar calefacción por resistencia eléctrica en lugar de una bomba de calor. ¿Cuánta energía eléctrica necesitaría para suministrar al interior de la casa la

misma cantidad de calor que en la parte (a)? Considere una bomba de calor de Carnot que suministra calor al interior de una casa para mantenerla a 68°F. Demuestre que la bomba de calor suministra menos calor por cada joule de energía eléctrica empleado para operar la unidad a medida que disminuye la temperatura exterior. Observe que este comportamiento es opuesto a la dependencia de una máquina de calor de Carnot respecto a la diferencia entre las temperaturas de los depósitos. Explique a qué se debe esto.

20.42 Una máquina de calor opera empleando el ciclo de la figura 20.21. La sustancia de trabajo es 2.00 moles de helio gaseoso, que alcanza una temperatura máxima de 327°C. Suponga que el helio se puede tratar como gas ideal. El proceso *bc* es isotérmico. La presión en los estados *a* y *c* es de 1.00×10^5 Pa, y en el estado *b*, de 3.00×10^5 Pa. a) ¿Cuánto calor entra en el gas y cuánto sale del gas en cada ciclo? b) ¿Cuánto trabajo efectúa la máquina en cada ciclo y qué eficiencia tiene? c) Compare la eficiencia de esta máquina con la máxima eficiencia que puede lograrse con los depósitos caliente y frío que se usan en este ciclo.

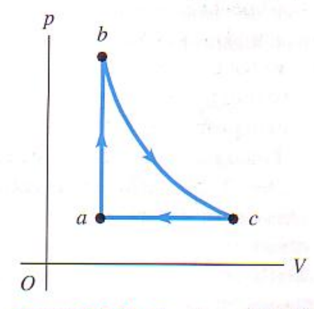


Figura 20.21 Problema 20.42.

20.43 Imagine que, como ingeniero mecánico, le piden diseñar una máquina de Carnot que use como sustancia de trabajo 2.00 moles de un gas monoatómico con comportamiento ideal y opere con un depósito caliente a 500°C. La máquina debe levantar 2.00 m una masa de 15.0 kg en cada ciclo, empleando un suministro de calor de 500 J. El gas en la cámara de la máquina puede tener un volumen mínimo de 5.00 L durante el ciclo. a) Dibuje un diagrama *pV* para este ciclo, indicando dónde entra calor en el gas y dónde sale de él. b) ¿A qué temperatura debe estar el depósito frío? c) Calcule la eficiencia térmica de la máquina. d) ¿Cuánta energía térmica gasta esta máquina en cada ciclo? e) Calcule la presión máxima que tendrá que resistir la cámara de gas.

20.44 Una planta de electricidad experimental en el Laboratorio de Energía Natural de Hawaii genera electricidad a partir del gradiente de temperatura del océano. Las temperaturas superficial y de agua profunda son de 27°C y 6°C, respectivamente. a) Calcule la eficiencia teórica máxima de esta planta. b) Si la planta debe producir 210 kW de potencia, ¿con qué rapidez debe extraerse calor del agua tibia? ¿Con qué rapidez debe absorber calor el agua fría? Suponga la eficiencia teórica máxima. c) El agua fría que ingresa en la planta sale a 10°C. Calcule la rapidez, en kg/h y en L/h, con que debe fluir el agua fría por el sistema.

20.45 Calcule la eficiencia térmica de una máquina que opera sometiendo *n* moles de gas ideal diatómico al ciclo $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ que se muestra en la figura 20.22.

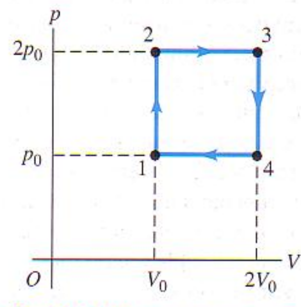


Figura 20.22 Problema 20.45.

20.46 Un cilindro contiene oxígeno a una presión de 2.00 atm y 300 K. El volumen es de 4.00 L. Suponga que el O_2 se puede tratar como gas ideal, y que se somete a los procesos siguientes:

(i) Calentar a presión constante del estado inicial (estado 1) al estado 2, donde $T = 450$ K.
(ii) Enfriar a volumen constante a 250 K (estado 3).
(iii) Comprimir a temperatura constante a un volumen de 4.00 L (estado 4).
(iv) Calentar a volumen constante a 300 K, regresando el sistema al estado 1.

a) Muestre estos cuatro procesos en un diagrama *pV*, dando los valores numéricos de *p* y *V* en cada estado. b) Calcule *Q* y *W* para cada proceso. c) Calcule el trabajo neto efectuado por el O_2. d) Determine la eficiencia de este dispositivo como máquina de calor y compárela con la de una máquina de ciclo de Carnot que opera entre las mismas temperaturas mínima y máxima de 250 K y 450 K.

20.47 Procesos termodinámicos en un refrigerador. Un refrigerador opera con el ciclo de la figura 20.23. Los pasos de compresión ($d \rightarrow a$) y expansión ($b \rightarrow c$) son adiabáticos. La temperatura, presión y volumen del refrigerante en cada estado son:

Estado	T (°C)	P (kPa)	V (m^3)	U (kJ)	Porcentaje que es líquido
a	80	2305	0.0682	1969	0
b	80	2305	0.00946	1171	100
c	5	363	0.2202	1005	54
d	5	363	0.4513	1657	5

a) En cada ciclo, ¿cuánto calor pasa del interior del refrigerador al refrigerante mientras éste está en el evaporador? b) En cada ciclo, ¿cuánto calor pasa del refrigerante al aire exterior mientras el refrigerante está en el condensador? c) En cada ciclo, ¿cuánto trabajo efectúa el motor del compresor? d) Calcule el coeficiente de rendimiento del refrigerador.

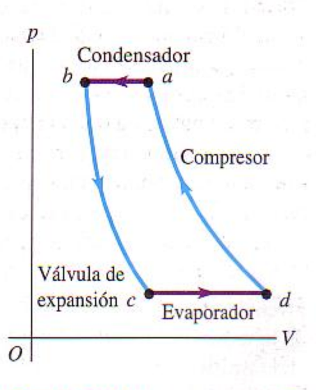


Figura 20.23 Problema 20.47.

20.48 Un gas monoatómico con comportamiento ideal se somete al ciclo de la figura 20.24 en la dirección indicada. El camino del proceso $c \rightarrow a$ es una recta en el diagrama *pV*. a) Calcule *Q*, *W* y ΔU para cada

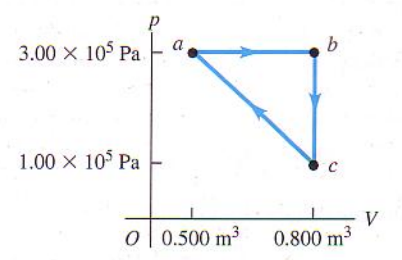


Figura 20.24 Problema 20.48.

proceso: $a \to b$, $b \to c$ y $c \to a$. b) Calcule Q, W y ΔU para un ciclo completo. c) Determine la eficiencia del ciclo.

20.49 Motor de ciclo Stirling. El *ciclo Stirling* es similar al ciclo Otto, excepto que la compresión y expansión del gas se efectúan a temperatura constante, no adiabáticamente. El ciclo Stirling se usa en motores de combustión *externa*, lo que implica que el gas del interior del cilindro no participa en la combustión. El calor se suministra quemando combustible constantemente afuera del cilindro, no explosivamente en su interior como en el ciclo Otto. Por ello, los motores de ciclo Stirling son más silenciosos, pues no hay válvulas de admisión y escape (una fuente importante de ruido). Si bien se usan motores Stirling pequeños para diversos propósitos, las versiones para automóvil no han tenido éxito porque son más grandes, pesadas y costosas que los motores de auto convencionales. La secuencia de pasos del fluido de trabajo dentro del ciclo (Fig. 20.25) es:

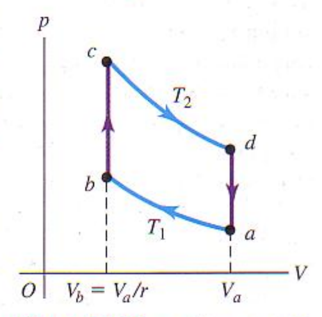


Figura 20.25 Problema 20.49.

(i) Compresión isotérmica a temperatura T_1 del estado inicial a al estado b, con una razón de compresión r.
(ii) Calentamiento a volumen constante al estado c a temperatura T_2.
(iii) Expansión isotérmica a T_2 al estado d.
(iv) Enfriamiento a volumen constante de vuelta al estado a.

Suponga que el fluido de trabajo es n moles de gas ideal (cuya C_V es independiente de T). a) Calcule: Q, W y ΔU para cada proceso, $a \to b$, $b \to c$, $c \to d$ y $d \to a$. b) En el ciclo Stirling, las transferencias de calor en $b \to c$ y $d \to a$ no implican fuentes de calor externas, sino que usan *regeneración*: la misma sustancia que transfiere calor al gas del interior del cilindro en el proceso $b \to c$ absorbe calor de dicho gas en el proceso $d \to a$. Por tanto, las transferencias de calor $Q_{b\to c}$ y $Q_{d\to a}$ no afectan la eficiencia del motor. Explique esta afirmación comparando las expresiones para $Q_{b\to c}$ y $Q_{d\to a}$ calculadas en la parte (a). c) Calcule la eficiencia de un motor de ciclo Stirling en términos de las temperaturas T_1 y T_2 y compárela con la de una máquina de ciclo de Carnot que opera entre las mismas temperaturas. (Históricamente, el ciclo Stirling se inventó antes que el de Carnot.) ¿Este resultado viola la segunda ley de la termodinámica? Explique. Lamentablemente, los motores de ciclo Stirling reales no pueden lograr esta eficiencia a causa de problemas con los procesos de transferencia de calor y pérdidas de presión en el motor.

20.50 Una máquina de Carnot opera entre dos depósitos de calor a temperaturas T_C y T_F. Un inventor propone aumentar la eficiencia operando una máquina entre T_C y una temperatura intermedia T', y una segunda máquina entre T' y T_F usando el calor expulsado por la primera. Calcule la eficiencia de este sistema compuesto y compárela con la de la máquina original.

20.51 La máxima potencia que puede extraer una turbina de viento de una corriente de aire es aproximadamente

$$P = kd^2v^3$$

donde d es el diámetro de las aspas, v es la rapidez del viento y la constante $k = 0.5\ \text{W} \cdot \text{s}^3/\text{m}^5$. a) Explique la dependencia de P respecto de d y de v considerando un cilindro de aire que pasa por las aspas en un tiempo t (Fig. 20.26). Este cilindro tiene diámetro d, longitud $L = vt$ y densidad ρ. La turbina de viento Mod-5B de Kahaku en la isla hawaiiana de Oahu tiene un diámetro de aspas de 97 m (un poco más largo que un campo de fútbol americano), está sobre una torre de 58 m y puede producir 3.2 MW de potencia eléctrica. Suponiendo una eficiencia de 25%, ¿qué rapidez del viento (en m/s y km/h) se requiere para producir esa potencia? c) Las turbinas de viento comerciales suelen colocarse en cañones montañosos o lugares por donde pasa el viento. ¿Por qué?

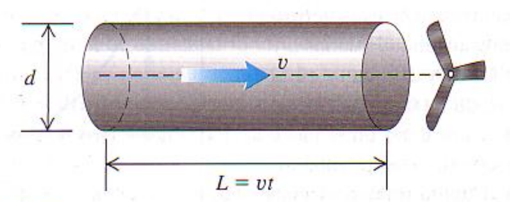


Figura 20.26 Problema 20.51.

20.52 Economía de combustible y desempeño de automóviles. El motor de ciclo Otto de un Volvo V70 tiene una razón de compresión de $r = 8.5$. La calificación de economía de combustible de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.) para este vehículo es de 25 mi/gal a velocidades de autopista (105 km/h = 65 mi/h). La gasolina tiene un calor de combustión de 4.60×10^7 J/kg, y su densidad es de 740 kg/m^3. a) Determine la rapidez de consumo de gasolina (en L/h) a 105 km/h. b) Calcule la eficiencia teórica del motor. Use $\gamma = 1.40$. c) ¿Cuánta potencia (en watts y hp) produce el motor a 105 km/h? Suponga que el motor opera con su eficiencia teórica. Como comparación, el motor del Volvo V70 tiene una potencia máxima de 236 hp. d) Por las pérdidas de calor y la fricción en la transmisión, la eficiencia real es de cerca de 15%. Repita la parte (c) utilizando esta información. ¿Qué fracción de la potencia máxima posible se usa para conducir a velocidades de autopista?

20.53 Termodinámica de un motor de automóvil. Un Volkswagen Passat tiene un motor de ciclo Otto de seis cilindros con razón de compresión $r = 10.6$. El diámetro de cada cilindro, llamado *barreno* del motor, es de 82.5 mm. La distancia que el pistón se mueve durante la compresión en la figura 20.4 (la *carrera* del motor) es de 86.4 mm. La presión inicial de la mezcla aire-combustible (en el punto a de la Fig. 20.5) es de 8.50×10^4 Pa, y la temperatura inicial es de 300 K (la del aire exterior). Suponga que, en cada ciclo, se agregan 200 J de calor a cada cilindro al quemarse la gasolina y que el gas tiene $C_V = 20.5$ J/mol · K y $\gamma = 1.40$. a) Calcule el trabajo total realizado en un ciclo por cada cilindro del motor y el calor que se desprende cuando el gas se enfría a la temperatura del aire exterior. b) Calcule el volumen de la mezcla aire-combustible en el punto a del ciclo. c) Calcule: la presión, volumen y temperatura del gas en los puntos b, c y d del ciclo. Dibuje un diagrama pV que muestre los valores numéricos de p, V y T para cada uno de los cuatro estados. d) Compare la eficiencia de este motor con la de

una máquina de Carnot que opera entre las mismas temperaturas máxima y mínima.

20.54 En una fábrica, una barra aislada de hierro de 65.0 cm de longitud, conductividad térmica de 79.5 W/m • K y área de sección transversal de 15.0 cm^2 conduce calor de un horno a 250.0°C a un depósito de agua a 40.0°C. a) ¿Cuánto cambia la entropía de la fábrica cada segundo por causa de este proceso? b) Interprete su respuesta en términos de la reversibilidad o irreversibilidad de este proceso.

20.55 Energía no disponible. Según el análisis de la entropía y la segunda ley que hicimos después del ejemplo 20.10 (sección 20.7), el aumento de entropía durante un proceso irreversible está asociado a una disminución en la disponibilidad de energía. Considere un ciclo de Carnot que usa un depósito frío con temperatura Kelvin T_f. Se trata de un verdadero depósito, lo bastante grande como para que no cambie su temperatura cuando acepta calor de la máquina. Ésta última acepta calor de un objeto a temperatura T', donde $T' > T_f$. El objeto tiene tamaño finito, así que se enfría cuando se extrae calor de él. La máquina sigue operando hasta que $T' = T_f$. a) Demuestre que la magnitud total del calor expulsado al depósito de baja temperatura es $T_f|\Delta S_c|$, donde ΔS_c es el cambio de entropía del depósito caliente. b) Aplique el resultado de la parte (a) a 1.00 kg de agua que inicialmente está a una temperatura de 373 K, como fuente de calor para la máquina, y $T_f = 273$ K. ¿Cuánto trabajo mecánico total puede efectuar la máquina hasta detenerse? c) Repita la parte (b) para 2.00 kg de agua a 323 K. d) Compare la cantidad de trabajo que puede obtenerse de la energía contenida en el agua del ejemplo 20.10 antes y después de mezclarse. Indique si su resultado demuestra que ahora hay menos energía disponible.

20.56 Recalcule el cambio de entropía entre los puntos a y b de la figura 20.15c si el camino reversible es: a) una expansión isobárica a $2V$ seguida de un proceso isocórico; b) un enfriamiento isocórico a $p_a/2$ seguido de una expansión isobárica.

20.57 Un cubo de hielo de 0.0500 kg a una temperatura inicial de −15.0°C se coloca en 0.600 kg de agua a $T = 45.0$°C en un recipiente aislado con masa despreciable. Calcule el cambio de entropía del sistema.

20.58 a) Para el ciclo Otto de la figura 20.5, calcule los cambios de entropía del gas en cada uno de los procesos a volumen constante $b \rightarrow c$ y $d \rightarrow a$ en términos de las temperaturas T_a, T_b, T_c y T_d, el número de moles n y la capacidad calorífica C_V del gas. b) Calcule el cambio total de entropía en el motor durante un ciclo. (*Sugerencia:* Use la relación entre T_a y T_b y entre T_d y T_c.) c) Los procesos $b \rightarrow c$ y $d \rightarrow a$ se efectúan irreversiblemente en un motor Otto real. Explique cómo puede conciliarse esto con el resultado de la parte (b).

20.59 Diagrama *TS*. a) Dibuje una gráfica de un ciclo de Carnot, con la temperatura Kelvin en el eje vertical y la entropía en el horizontal. Esto es un diagrama de temperatura-entropía, o *TS*. b) Demuestre que el área bajo cualquier curva que representa un camino reversible en un diagrama *TS* representa el calor absorbido por el sistema. c) Deduzca de su diagrama la expresión para la eficiencia térmica de un ciclo de Carnot. d) Dibuje un diagarma *TS* para el ciclo Stirling, descrito en el problema 20.49. Use este diagrama para relacionar las eficiencias de los ciclos de Carnot y Stirling.

20.60 Un estudiante de física sumerge un extremo de una varilla de cobre en agua hirviendo a 100°C y el otro en una mezcla agua-hielo a 0°C. Los costados de la varilla están aislados. Una vez que la varilla alcanza condiciones de estado estable, 0.160 kg de hielo se derrite en cierto tiempo. Para este lapso, calcule: a) el cambio de entropía del agua en ebullición; b) el cambio de entropía de la mezcla agua-hielo; c) el cambio de entropía de la varilla de cobre; d) el cambio total de entropía del sistema.

20.61 Imagine que, a fin de calentar una taza de agua (250 cm^3) para hacer café, coloca un elemento calentador eléctrico en la taza. Mientras la temperatura del agua aumenta de 20°C a 65°C, la temperatura del elemento permanece en 120°C. Calcule el cambio de entropía de: a) el agua; b) el elemento; c) el sistema de agua y elemento. (Use el mismo supuesto acerca del calor específico del agua que usamos en el ejemplo 20.10 (sección 20.7) y desprecie el calor que fluye a la taza en sí.) d) ¿Este proceso es reversible o irreversible? Explique.

20.62 Un objeto de masa m_1, capacidad calorífica específica c_1 y temperatura T_1 se coloca en contacto con otro de masa m_2, capacidad calorífica específica c_2 y temperatura $T_2 > T_1$. En consecuencia, la temperatura del primer objeto aumenta a T y la del segundo baja a T'. a) Demuestre que el aumento de entropía del sistema es

$$\Delta S = m_1 c_1 \ln \frac{T}{T_1} + m_2 c_2 \ln \frac{T'}{T_2}$$

y que la conservación de la energía exige que

$$m_1 c_1 (T - T_1) = m_2 c_2 (T_2 - T')$$

b) Demuestre que el cambio de entropía ΔS, considerado como función de T, es *máximo* si $T = T'$, la condición de equilibrio termodinámico. c) Analice el resultado de la parte (b) en términos de la idea de entropía como medida del desorden.

Problema de desafío

20.63 Considere un ciclo Diesel que inicia (punto a de la figura 20.6) con aire a una temperatura T_a. El aire puede tratarse como gas ideal. a) Si la temperatura en el punto c es T_c, deduzca una expresión para la eficiencia del ciclo en términos de la razón de compresión r. b) Calcule la eficiencia si $T_a = 300$ K, $T_c = 950$ K, $\gamma = 1.40$ y $r = 21.0$.